

doi:10.3799/dqkx.2017.584

# 闪电熔岩的形态、成分及其与类似天然物质的对比

周雨欣<sup>1</sup>, 王佳琦<sup>1</sup>, 李 淳<sup>2</sup>

1. 中国人民大学附属中学, 北京 100080

2. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044

**摘要:** 闪电熔岩是由于闪电击中地表, 瞬间高温使矿物熔融后凝结而成的天然玻璃质岩石。由于标本的稀缺性, 国内在该方面的研究几近空白。研究采用 CT 扫描、三维立体成像技术和电子探针等多种观察仪器, 揭示了砂质管状闪电熔岩的内、外部结构特征: 玻璃质管壁外表面粗糙且形态复杂, 内表面光亮且颜色与外表面不同, 管壁内部含大量微小气孔, 管道内部可以分为完全贯通、局部堵塞和完全封闭等状态; 利用电子探针测定了闪电熔岩的成分:  $\text{SiO}_2$  含量极高, 几乎为纯净的玻璃质, 仅含有极少量其他金属元素; 进一步对比了闪电熔岩、火山玻璃和玻璃陨石在外观、内部结构及成分上的区别, 并验证了内蒙古地区类似管状岩石不是闪电熔岩。本研究对闪电熔岩这种罕见的天然物质进行了初步观测, 为今后对闪电熔岩更多的科研应用提供基础参考。

**关键词:** 闪电熔岩; 火山玻璃; 玻璃陨石; 管状构造; 二氧化硅; 岩石学。

中图分类号: P583

文章编号: 1000-2383(2017)12-2276-06

收稿日期: 2016-11-25

## Morphology and Composition of Fulgurite and Comparison with Similar Natural Materials

Zhou Yuxin<sup>1</sup>, Wang Jiaqi<sup>1</sup>, Li Chun<sup>2</sup>

1. The High School Affiliated to Renmin University of China, Beijing 100080, China

2. Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Beijing 100044, China

**Abstract:** Fulgurites are natural glass material which is formed when lightning strikes and melts the ground and the super high temperature fuses and vitrifies mineral grains. The fulgurite was seldom studied in China due to the rareness of the specimens. By using several new technologies such as CT scanning, 3-D reconstruction of the interior structure and electron probe microanalysis, the results reveal the detailed morphology of both the external and interior structures of the fulgurite as well as its mineral composition. Its external surface is complex and coarse while the internal surface is bright and different from the internal surface in color. The internal surface is full of foramina, and can be classed into three types: fully run-through, partially closed, and completely closed. The fulgurite has the dominant composition of  $\text{SiO}_2$ , with only small proportion of other metal elements. It also was compared with volcanic glass and tektite and determined that a tubular structured stone from Inner Mongolia is not fulgurite. This paper provides some basic data for future study and application of the fulgurite.

**Key words:** fulgurite; volcanic glass; tektite; tubular structure; silicon dioxide; petrology.

## 0 引言

闪电熔岩又名“雷击石”, 是一种罕见的特殊天然物质, 是火成岩、沉积岩和变质岩之外, 通过第 4 种成岩方式——“雷击”形成的玻璃质岩石。根据形

态和组成差异, 闪电熔岩可以划分为多种类型 (Mohling, 2004), 其中最为常见的是“砂质管状”闪电熔岩, 其形成的大致过程是: 在地表硅质物质 (通常为二氧化硅) 含量较高的沙漠、海滩等区域, 雷雨过程中闪电击中地表后巨大能量产生瞬间局部高

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 41772006)。

作者简介: 李淳 (1973-), 男, 研究员, 博士, 从事古脊椎动物学研究及地史时期海陆生物多样性的演变等相关工作。

ORCID: 0000-0003-3462-1748. E-mail: lichun@ivpp.ac.cn

引用格式: 周雨欣, 王佳琦, 李淳, 2017. 闪电熔岩的形态、成分及其与类似天然物质的对比. 地球科学, 42(12): 2276-2281.

温,使地下一定深度内以二氧化硅为主的多种矿物沿着电流通过的路径在极短时间内有序熔融、气化,形成中空管道,管道周围熔融部分吸附周边物质并迅速冷却,随即形成玻璃质管壁(Tomas *et al.*, 2009)。做为闪电作用下新生的矿物混合体,闪电熔岩的形成需要多种地球物化条件共同作用,与地表成分、湿度、降雨强度、雷电强度等诸多因素有关,且多见于人迹罕至的沙漠、海滩等环境,形成过程偶然,不易被发现,辨识困难,因而极为罕见(Wright Jr, 1998)。

闪电熔岩生成后会会长久保存在地层中,所以地层中的雷击石是曾经的雷击事件的记录,能反映当时该地区远古时期发生的雷电天气状况。例如, Sponholz *et al.* (1993) 认为区域性的古环境受到复杂沙丘地形、地貌的影响。他们对位于尼日尔的撒哈拉沙漠中部地区晚更新世以来雷击石的时空分布和密度变化的分析研究,为恢复这一时期该区域的古环境恢复提供了重要信息:如今的撒哈拉沙漠很少出现雷雨天气,但是闪电熔岩在撒哈拉南部地区的大量出现,表明在全新世中晚期该区域雷暴雨天气频繁,并且降雨量大;同时,雷击石的密度具有由南向北减少的趋势,反映了暴雨发生的频率和强度由南向北减弱。

闪电熔岩形成时会在管壁内部的腔隙中封存微量的古代大气,对这些气体进行分析能够获取当时该地区的远古环境信息。为讨论古大气的成分组成提供直接的证据。例如, Navarro-González *et al.* (2007) 对非洲利比亚沙漠中形成于 1.5 万年前的雷击石中包裹的古大气进行了分析,发现这些雷击石所在地表的碳/氮元素比值与现今沙漠中的半干旱区域相似,这

些区域现在分布在北纬  $17^{\circ}$  以南,而闪电熔岩则发现于北纬  $24^{\circ}$ ,说明半干旱区域曾经至少扩展到北纬  $24^{\circ}$  以上研究表明,闪电熔岩属性的确定,对判断地质历史时期局部地区的古环境是有意义的。

除了闪电熔岩以外,地球上还有另外两种天然成因的玻璃质岩石:火山玻璃和玻璃陨石。火山玻璃又称黑曜石,是熔岩喷出后迅速冷却(无法结晶)形成的一种玻璃质岩石(Bates and Jackson, 1984; 孙春青等, 2016);玻璃陨石则并非真正意义上的陨石,而是地外物质撞击地球某些区域后,地表的二氧化硅熔融、飞溅、冷却落地后形成的玻璃状物质,保留了多种与空气动力学有关的外部形态(French, 1998)。玻璃陨石多发现在南、北纬  $55^{\circ}$  之间的区域,著名产地包括北非、东南亚、澳大利亚以及捷克等地,其中我国两广及海南地区的玻璃陨石大约形成于 78 万年前的陨石撞击事件,古代文献及民间称之为“雷公墨”。

闪电熔岩、火山玻璃和玻璃陨石均为玻璃质岩石,它们之间的外观差异是明显的(图 1)。此外,由于成因不同以及受原岩的影响,这三种岩石的微观结构和具体矿物构成必然也有所不同,但是长期以来几乎没有研究工作对此加以讨论。本文利用多种方法揭示闪电熔岩的内部结构以及矿物组成,并籍此与其它玻璃质岩石加以区别。

## 1 “雷击石”的形态、结构、成分及形成过程

### 1.1 研究材料

通过天文爱好者,获取了产自撒哈拉沙漠(摩洛

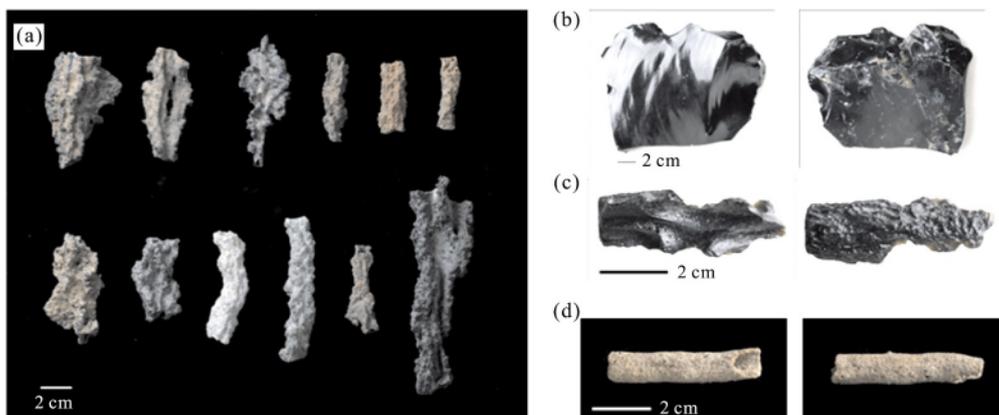


图 1 样品照片

Fig.1 Photographs of the samples

a. 闪电熔岩样品(从左至右, 上排依次为 S1 至 S6, 下排依次为 S7 至 S12); b. 火山玻璃样品 H1; c. 玻璃陨石样品 B1; d. 沙质管状样本 G1

哥)的闪电熔岩样本 12 件(图 1a;S1-S12),并分别在长白山、雷州半岛两地采集火山玻璃(图 1b;H1)和玻璃陨石(图 1c;B1)样本各 1 件,采集自内蒙古阿拉善荒漠地区的“沙质管状物”样本 1 件(图 1d;G1)。

## 1.2 研究方法

利用中国科学院有关院所的仪器设备进行下列工作:(1)借助高精度 CT 扫描和三维立体成像技术,重建闪电熔岩外部与内部的精细结构,其中 S1 至 S11 利用 225 Micro CT 扫描,S12 因长度较长而采用 450I CT 扫描,图像数据利用 VGStudio MAX 2.2 软件,开展 3D 形态可视化重建,并制做 3D 动画,从而由内到外了解闪电熔岩的立体形态。(2)通过电子显微镜和电子探针,观测分析闪电熔岩、火山玻璃和玻璃陨石的微观结构与构成组分,为查明各

样品的成分构成,笔者对闪电熔岩样品 S12、火山玻璃 H1、玻璃陨石 B1 沿横截面取样、磨片,利用 JXA-8100 电子探针显微分析仪在各样品上选取代表性区域测试。

## 2 结果分析

### 2.1 闪电熔岩的外观与内部结构

外观:就总体而言,样品 S1-S12 属于 Mohling (2004)分类体系中的“砂质闪电熔岩”,完整的闪电熔岩片段呈树枝状,外壁形态不规则,具有各种形态的凸起和皱褶,外壁表面粗糙,肉眼可见沙粒,整体呈现深灰黑色至黄白色,绝大部分样本成管状,样品 S3 管道明显纤细,呈“封闭”状态,S12 样品因纵向破

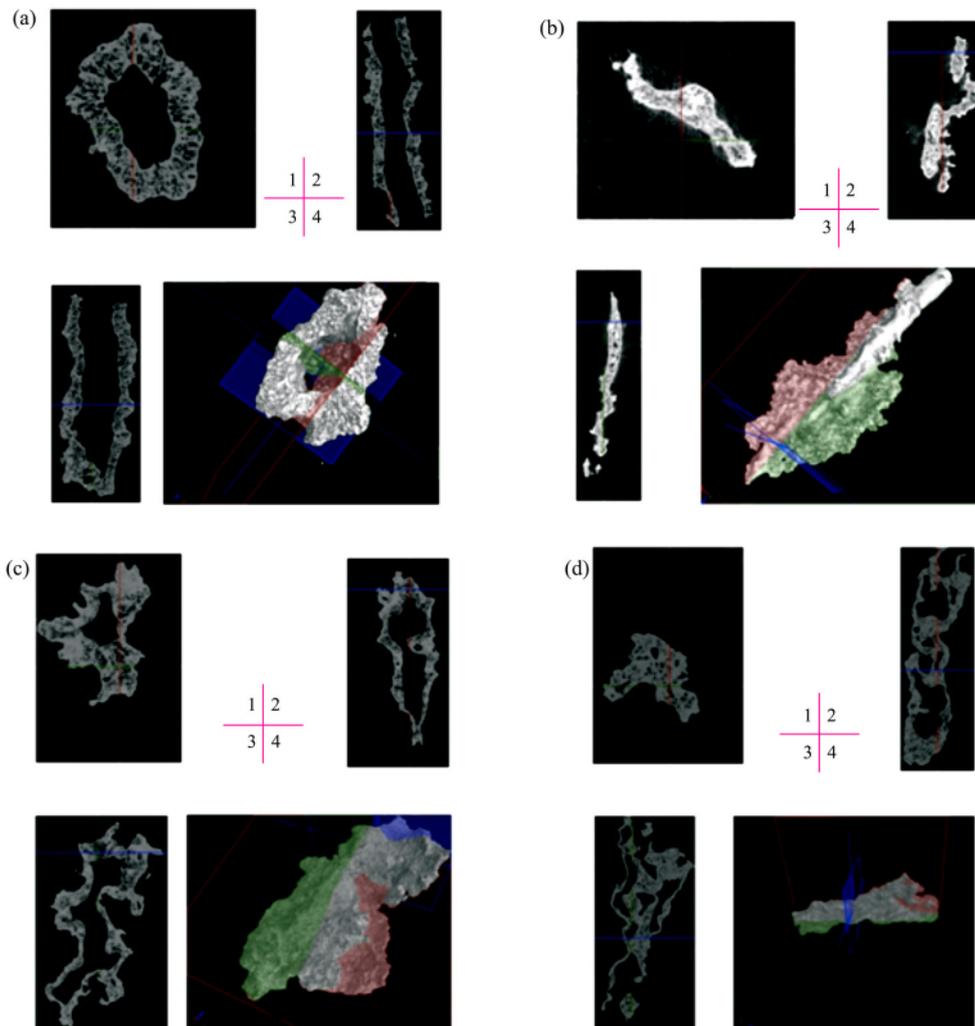


图 2 闪电熔岩样品的高精度 CT 扫描截面图

Fig.2 Cross section of fulgurite samples by CT

a.闪电熔岩样品 S1 代表竖直贯通管道型;b.闪电熔岩样品 S3 代表完全封闭管道型;c.闪电熔岩样品 S7 代表曲折贯通管道型;d.闪电熔岩样品 S11 代表局部封闭管道型;图像复原图中的 4 为三维重建图,1、2 和 3 图分别对应蓝色、绿色和红色 3 个截面)

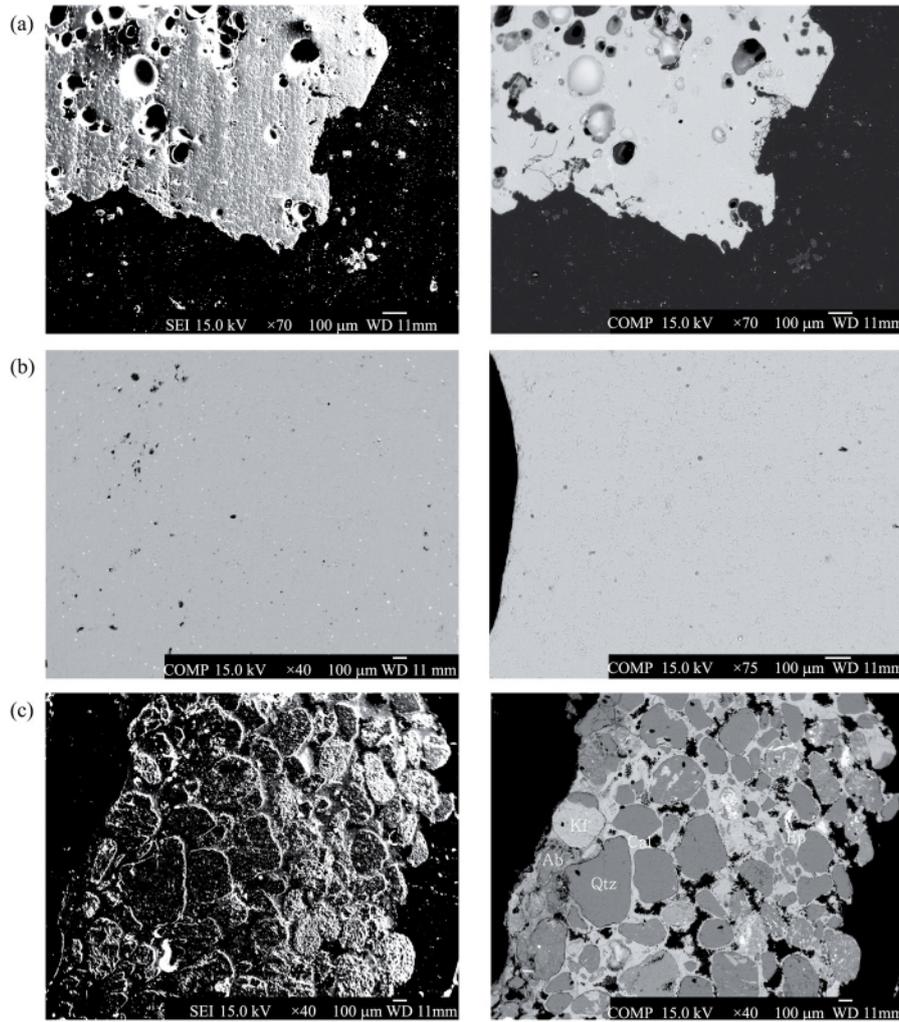


图 3 样品的形貌像和成分像

Fig.3 SEI (secondary electron image) and BSE (backscattered electron image) of the samples a.闪电熔岩 S12 的形貌像(SEI 图像,左)和成分像(BSE 图像,右);b.火山玻璃 H1(左)与玻璃陨石 B1(右)的成分像(BSE 图像);c.沙质管状样本 G1 的形貌像(SEI 图像,左)和成分像(BSE 图像,右,Kf.钾长石,Ab.钠长石,Qtz.石英,Cal.方解石,Ep.帘石)

表 1 雷击石、火山玻璃和玻璃陨石形态成分对比及实验样品测量数据

Table 1 Component comparison of fulgurite, volcanic glass and tektite

	雷击石	火山玻璃	玻璃陨石
外形	树枝状,表面附着砂粒	块状,表面洁净,断口呈典型的贝壳状	球状、饼状、哑铃状、泪滴状及不规则状
颜色	灰色、黄白	黑色	黑色
内部结构	中空管状	实体	实体
显微结构	熔融凝固,含大量大型气泡	熔融凝固,含极少量微小气泡	熔融凝固,含极少量微小气泡
成分			
SiO <sub>2</sub>	97%	74%	73%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	小于 1%	13%	13%
其他	小于 1%	Na <sub>2</sub> O:4%、K <sub>2</sub> O:5%、FeO:1%	Na <sub>2</sub> O:1%、K <sub>2</sub> O:2%、MgO:2%、FeO:4%、CaO:2%
成因	雷击,地表物质高温熔融后凝结	火山熔岩快速凝固	陨石撞击地球,地表物质熔融、飞溅、凝固

裂而可见其内壁,呈波浪状起伏,深灰蓝色,有暗淡的玻璃光泽.显微镜下观察,管壁主要由玻璃质的基底构成,基底上粘附有砂粒,以及微小气泡破裂后留下的浅坑,砂粒和浅坑大小均为 1 mm 左右.

内部结构:CT 扫描显示,绝大多数样品管道中空,但只有部分样品如 S1 因内壁相对平整而基本竖直贯通(图 2a),样本 S3 因管道纤细而完全呈封闭状态,一如外观所见(图 2b);其余样本多因内壁的

不规则凸起而呈复杂的凹凸状,如 S7(图 2c);部分样本如 S11(图 2d)等在管道中部局部堵塞而封闭。在各样本的各向截面图中,可以观察到管壁内部到处都充满了小空腔。从各图的横截面(即各图的 1 图)可以看出,气泡沿内壁向外壁的方向拉长,而且接近内壁端比较尖锐,接近外壁端比较圆钝,呈现出辐射分散开的状态。管道内壁有一个约 0.1 mm 左右的深色层,内表面可见明显沙粒状小凹陷。

由此可见,闪电熔岩的基本结构是“中空的玻璃质岩管”,管壁厚薄不一,管道曲直不同,有完全贯通、局部贯通和完全封闭等状态,其中贯通者又有管道平直或管道曲折两种情况。在石英颗粒熔融、周边物质气化形成岩管的同时,熔融的二氧化硅向岩管内部会有不同程度的充填,从而造成岩管的分隔甚至堵塞。玻璃质管壁内大量小型空腔,是石英熔融、冷却时形成的气泡,这些气泡有的在外壁或内壁表面破裂形成凹坑,更多的则被封存在管壁之中,由于形成时二氧化硅仍然是熔融状态,导致管壁内气泡有不同程度的辐射状拉伸。

## 2.2 闪电熔岩的微观结构及化学成分

图 3 为电子探针获得样品的形貌像(SEI 图像)和成分像(BSE 图像)。结果显示,闪电熔岩 S12 含有大量气孔,成分基本为玻璃质二氧化硅(图 3a),含量高达 96%~98%(表 1),另有 FeO、K<sub>2</sub>O 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等其他微量物质均不足 1%,还含有 Mn、Ti 和 Na 等微量成分可忽略不计,因其测定含量在测量误差范围内,无测量意义。此外,分别取外壁表面、管壁中间和内壁表面不同位置,测试结果非常接近,可见闪电熔岩管体各个位置成分较为一致。

## 3 闪电熔岩与火山玻璃、玻璃陨石和其他类似物质的对比

闪电熔岩与火山玻璃、玻璃陨石的内部、外部结构存在明显差异:相对于闪电熔岩,火山玻璃呈块状,外表更为光滑,玻璃光泽明显,不具有凹凸结构,内部不具有管道和空腔;玻璃陨石形态不规则,表面凹凸不平但无沙粒结构,玻璃光泽较闪电熔岩更为鲜亮,内部也不具有中空的管道。

利用电子探针技术,同样可以对火山玻璃与玻璃陨石进行微观结构与成分组成的测定(孙春青等,2016;王键等,2016)。结果显示,火山玻璃与玻璃陨石的结构和主体成分几乎一致,基本为玻璃质的二

氧化硅(图 3b),含很少量极为细小的气孔,与闪电熔岩微观结构差异显著。火山玻璃与玻璃陨石的 SiO<sub>2</sub> 含量都约为 73%,比例明显低于闪电熔岩;而二者的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量约 13%,且 Na、K、Mg 和 Fe 的含量均明显高于闪电熔岩。火山玻璃和玻璃陨石之间也存在成分的细微差异(表 1)。

采集自内蒙古阿拉善荒漠地区的“沙质管状物”G1 样品被民间收藏者怀疑为闪电熔岩。通过肉眼观察可见,这一样本虽然与后者一样为中空的管状结构,但仍有较大区别,除了管壁外缘规整,没有不规则突出物外,最为重要的是没有“明显的玻璃化”。为了最终确认这一样本的性质,我们同样对其进行了电镜观察和电子探针测定。结果表明,该样本管壁不呈熔融后的凝结状态,而是由多种矿物颗粒胶结而成(图 3c),主要成分是石英、方解石、钠长石、钾长石以及帘石类矿物等。从形貌像可见,所有矿物颗粒完整而均一,没有任何高温蚀变迹象,电子探针检测的化合物构成和元素比例也显示其与闪电熔岩迥异。因此,这一标本不是闪电熔岩。

## 4 结论

(1)对闪电熔岩 12 件样品(S1 至 S12)进行了多方位的形态观察,利用高精度 CT 扫描和 3D 复原再现闪电熔岩的内部结构,识别出管壁富含气泡孔洞的结构及岩管中部贯通、局部堵塞及封闭等不同状态。

(2)实验所涉及的闪电熔岩、火山玻璃和玻璃陨石样本都是二氧化硅含量高的玻璃质岩石,除了成因不同而导致的宏观结构差别外,内部结构差别体现在闪电熔岩内含大量而密集的气孔,而火山玻璃和玻璃陨石更加致密,其外壁的玻璃光泽更为鲜亮,其内部不具有管道。后二者的微观结构几乎一致。

(3)利用电子探针测定闪电熔岩的化学成分,样品中二氧化硅含量高达 96%~98%,其他组分至少包括 Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、FeO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等,但含量极低(均低于 1%),是由于闪电熔岩形成时地球沉积岩中多石英矿物,电击中更容易熔化的便是石英而形成多硅的特征。

(4)产自内蒙古阿拉善地区的管状岩石(G1 样本)被怀疑为闪电熔岩,但是电子探针显示其管壁结构由多种矿物颗粒(主要是钾长石、钠长石、石英和帘石类)通过方解石胶结而成,没有任何玻璃化或高温蚀变迹象,与闪电熔岩显微结构和成分构成完全不同。经对比推测,G1 样本不是雷击石。

**References**

- Bates, R. L., Jackson, J. A., 1984. Dictionary of Geological Terms, Third Edition. Anchor Books, United Kindom.
- French, B. M., 1998. Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures. Technical Report, LPI-Contrib-954.1-132.
- Mohling, J. W., 2004. Exogenic Fulgurites from Elko County, Nevada: A New Class of Fulgurite Associated with Large Soil-Gravel Fulgurite Tubes. *Rocks & Minerals*, 79(5): 334-340. doi: 10.1080/00357529.2004.9925733
- Navarro-González, R., Mahan, S. A., Singhvi, A. K., et al., 2007. Paleoecology Reconstruction from Trapped Gases in a Fulgurite from the Late Pleistocene of the Libyan Desert. *Geology*, 35(2): 171-174. doi: 10.1130/G23246A.1
- Sponholz, B., Baumhauer, R., Felix-Henningsen, P., 1993. Fulgurites in the Southern Central Sahara, Republic of Niger and Their Palaeoenvironmental Significance. *The Holocene*, 3(2): 97-104. doi: 10.1177/095968369300300201
- Sun, C. Q., You, H. T., Liu, J. Q., et al., 2016. Differences between Whole Rock and Insitu Analysis on Tephra: Evidence from the 1600 a. cal. BP Eruption of Jinlongdingzi Volcano. *Earth Science*, 41(1): 97-104 (in Chinese with English abstract).
- Tomas, M. C., Rafael P, L. F., Ruth, G. L., 2009. The Fulgurite of Torre de Moncorvo (Portugal): Description and Analysis of the Glass. *European Journal of Mineralogy*, 21(4): 783-794. doi: 10.1127/0935-1221/2009/0021-1948
- Wang, J., Sun, F. Y., Li, B. L., et al., 2016. Age, Petrogenesis and Tectonic Implications of Permian Hornblendite in Turgurige, Urad Zhongqi, Inner Mongolia. *Earth Science*, 41(5): 792-808 (in Chinese with English abstract).
- Wright Jr, F. W., 1998. Florida's Fantastic Fulgurite Find. *Weatherwise*, 51(4): 28-31. doi: 10.1080/00431672.1998.9926145

**附中文参考文献**

- 孙春青, 游海涛, 刘嘉麒, 等, 2016. 火山灰全岩与原位分析差异: 以四海龙湾记录的 1600 年前金龙顶子火山喷发为例. *地球科学*, 41(1): 97-104.
- 王键, 孙丰月, 李碧乐, 等, 2016. 内蒙乌拉特中旗图古日格二叠纪角闪石岩年龄、岩石成因及构造背景. *地球科学*, 41(5): 792-808.